

19 BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENTAMT

12

Offenlegungsschrift

10

DE 42 32 526 A 1

51

Int. Cl.⁵:

G 01 F 1/66

G 01 P 5/00

G 01 D 1/16

G 01 S 15/88

21

Aktenzeichen:

P 42 32 526.9

22

Anmeldetag:

29. 9. 92

43

Offenlegungstag:

31. 3. 94

DE 42 32 526 A 1

71 Anmelder:

Wagner, Georg F., 83471 Berchtesgaden, DE

74 Vertreter:

Haft, U., Dipl.-Phys., 80469 München; Berngruber,
O., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat., 83457 Bayerisch Gmain;
Czybulka, U., Dipl.-Phys., Pat.-Anwälte, 80469
München

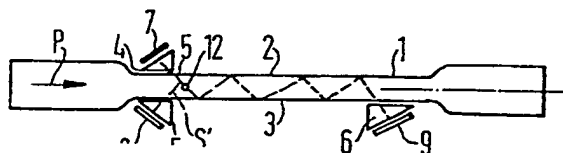
72 Erfinder:

gleich Anmelder

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Vorrichtung zur Messung kleiner Flüssigkeitsströme mit Hochfrequenz-Ultraschall und deren Verwendung

57 Eine Vorrichtung zur Messung kleiner Flüssigkeitsströme weist einen Sendeschallwandler (7) und einen Empfangsschallwandler (8) zur Strömungsmessung nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip auf, sowie im Abstand von dem Sendeschallwandler (7) einen weiteren Empfangsschallwandler (9) zur Messung des Flüssigkeitsstroms nach der Ultraschallphasenmessung, wobei der Schallstrahl (5) an der Innenwand des Meßrohrs (1) mehrmals reflektiert wird.



DE 42 32 526 A 1

Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur Messung kleiner Flüssigkeitsströme mit Hochfrequenz-Ultraschall. Sie hat auch die Verwendung dieser Vorrichtung zum Gegenstand.

Es sind Strömungsmeßvorrichtungen bekannt, die nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip arbeiten (vgl. DDR-Zeitschrift "Messen, Steuern, Regeln", Berlin (1988), Band 5, S. 232 bis 234). Der Doppler-Effekt in Flüssigkeiten und anderen Fluiden beruht darauf, daß die Teilchen in dem Fluid einen gebündelten Schallstrahl aufgrund ihrer relativen Bewegung zwischen Sende- und Empfangsschallwandler mit einer Frequenzverschiebung, der Doppler-Frequenz, reflektieren. D. h., wenn das Fluid keine Reflektorteilchen enthält, ist eine Strömungsmessung nach diesem Prinzip nicht möglich.

Ferner ist es bekannt, die Ultraschall-Phasenmessung zur Strömungsmessung zu verwenden (vgl. US-PS 3,568,661; VDI-Bericht Nr. 509, 1984, S. 40 bis 42). Die Phasenmessung beruht darauf, daß der in oder entgegen der Strömungsrichtung abgegebene Schallstrahl durch den Mitnahmeeffekt der Strömung schneller bzw. langsamer wird, wodurch sich eine Phasenverschiebung $\Delta\Phi$ nach der Formel $\Delta\Phi = -2\pi \cdot f \cdot \Delta T$ ergibt, worin f die Leitfrequenz und ΔT die strömungsabhängige Laufzeitdifferenz des Ultraschalls bedeuten.

Die Laufzeitdifferenz hängt vom Abstand zwischen dem Sende- und Empfangsschallwandler ab, die sich am Meßrohr meist schräg gegenüberliegen und von der Strömungsgeschwindigkeit.

Damit kleine Flüssigkeitsströme, beispielsweise zur Bildung eines Tropfens, überhaupt eine Geschwindigkeit erreichen, die nach der Phasenmessung erfaßbar ist, muß der Querschnitt des Rohres sehr klein ausgebildet werden. Dabei verringert sich der Abstand zwischen den beiden am Meßrohr schräg gegenüberliegenden Schallwandlern auf wenige Millimeter oder gar den Bruchteil eines Millimeters, so daß bei einer geringen Strömungsgeschwindigkeit die Phasenverschiebung entsprechend gering ist und daher nur mit einer aufwendigen Elektronik erfaßt werden kann.

Zur Durchflußmessung, z. B. von Warmwasser, im Bereich von 60 bis 1500 l pro Stunde ist es aus dem bereits erwähnten VDI-Bericht Nr. 509 bekannt, ein Meßrohr mit kastenförmigem Profil zu verwenden und den Schallstrahl über Reflektoren vom einem Schallwandler zum anderen zu leiten. Die Reflektoren und die als Interdigitalwandler ausgebildeten, sich über die gesamte Außenbreite des Kastenprofils erstreckenden Schallwandler sind in die Rohrrinnenwandung eingebaut.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine Vorrichtung zur Messung kleiner Flüssigkeitsströme nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip ohne größeren Aufwand so auszubilden, daß damit auch Flüssigkeitsströme, die keine Reflektoren enthalten, gemessen werden können. Dies wird erfindungsgemäß mit der im Anspruch 1 gekennzeichneten Vorrichtung erreicht. In den Unteransprüchen 2 bis 14 sind vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung angegeben, und in den Ansprüchen 15 und 16 bevorzugte Verwendungen derselben.

Wie sich gezeigt hat, führt bei der Phasenmessung ein kreisförmiger Querschnitt des Meßrohres zu einer Wanderung des Ultraschalls in der Rohrwandung um die Flüssigkeit herum vom Sender zum Empfänger, so daß man bei einem kleinen, kreisförmigen Rohrquerschnitt im Empfänger ein völlig unbrauchbares Signal

erhält. Versuche mit einem mit Luft gefüllten Meßrohr mit einem Innendurchmesser von 4 mm haben gezeigt, daß fast 100% des Signals des Senders zum Empfänger wandert. Wenn hingegen die Rohrwandung entsprechend der Erfindung im Bereich der Schallwandler zu einander parallele ebene Innen- und Außenflächen aufweist und die Schallwandler eine kleinere Breite als die ebenen Innenflächen besitzen, ist von dem vom Sender in das luftgefüllte Meßrohr abgestrahlte Signal weniger als 1% im Empfänger meßbar.

Nach der Erfindung wird eine vom Zustand des Flüssigkeitsstroms (Transparenz, Partikelinhalt und Anzahl, Viskosität, Verunreinigungen, Temperatur) weitestgehend unabhängige Meßvorrichtung zur Verfügung gestellt, weil gleichzeitig nach zwei verschiedenen Methoden die Strömung (mm/s) und die Partikelzahl bestimmt wird.

Nach der Erfindung kann nicht nur die direkte Phasendifferenzmethode, sondern auch eine Phasenmessung zur Anwendung kommen, bei der der Einfluß der Schallgeschwindigkeit durch Phasenregelung selbsttätig eliminiert wird, indem die Wellenlänge durch Frequenznachführung auf einem konstanten Wert gehalten wird (vgl. VDI-Bericht Nr. 509, 1984, S. 40 bis 42).

Zugleich wird durch die ebenen Innenflächen des Meßrohres der Schallstrahl bei der Ultraschallphasenmessung zwischen Sende- und Empfangsschallwandler an der Innenwand ohne Interferenzen reflektiert. Die Innenwandung des Meßrohres ist möglichst glatt ausgebildet, d. h. die Rauhtiefe soll unter 1 µm, vorzugsweise unter 0,2 µm liegen.

Bei einer Leitfrequenz von z. B. 10 MHz, einem Meßrohr mit einem Abstand der ebenen Innenflächen voneinander von 2 mm, einem Einstrahlwinkel von etwa 45° in die Flüssigkeit und einer Strömungsgeschwindigkeit von 100 mm/s ergibt sich bei Wasser eine Phasendifferenz von etwa 10°, wenn der Schallstrahl bei der Ultraschallphasenmessung mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung zwischen Sende- und Empfangsschallwandler an den ebenen Innenflächen des Meßrohres viermal reflektiert wird. Eine solche Phasenverschiebung ist meßtechnisch relativ leicht detektierbar, beispielsweise mit einem Oszillographen als Phasenverschiebungsdetektor, wie Versuche ergeben haben.

Überraschenderweise hat sich gezeigt, daß der Schallstrahl an der Rohrrinnenwandung relativ verlustfrei reflektiert wird, wenn das Meßrohr aus Stahl besteht. Es brauchen dann keine gesonderten Reflektorplättchen innen auf der Rohrrinnenwand aufgebracht zu werden, was angesichts des geringen Innendurchmessers des Meßrohres mit erheblichen Problemen verbunden wäre.

Die Stärke des Stahlrohres hängt im wesentlichen vom Innendruck ab. Eine Wandstärke von 0,5 bis 2 mm hat sich jedoch im allgemeinen als ausreichend bei einem Innendruck bis zu 10 bar erwiesen.

Besonders gute Ergebnisse konnten mit kaltgezogenen oder nahtlos verschweißten Rohren aus Chrom-Nickel-Stahl festgestellt werden, insbesondere die Stahlsorten nach DIN Werkstoff Nr. 1.4301, 1.4305 und 1.4571 sowie die Stahlsorten der DIN-Reihe 1.44.

Der Abstand der einander gegenüberliegenden ebenen Innenflächen des Meßrohres beträgt vorzugsweise 0,5 bis 10 mm, insbesondere 1 bis 3 mm.

Durch einen möglichst kleinen gegenseitigen Abstand der Innenflächen und damit einen entsprechend geringen Innenquerschnitt wird die Strömungsgeschwindigkeit erhöht und damit die Phasendifferenz. Ferner wird

die Meßkanalkonstante, d. h. die Auflösung bei der Messung nach dem Hochfrequenz-Ultraschall-Doppler-Prinzip um so größer, je kleiner der Innenquerschnitt des Rohres ist. So ist beispielsweise bei einer Sendefrequenz von 10 MHz die Meßkanalkonstante 5 Hz/mm/s. Bei einem Innendurchmesser des Meßrohres von 3 mm führt dies zu einer Doppler-Frequenz von 5 Hz/mm, bei einem Innendurchmesser von 1 mm hingegen zu 50 Hz/mm, da die Strömungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional zum Rohrrinnenquerschnitt und damit umgekehrt proportional zum Quadrat des Innendurchmessers des Rohres ist.

In einem Rohr mit geringem Innendurchmesser bewegen sich die Reflektorteilchen in dem Flüssigkeitsstrom mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, je nachdem, ob sie in der Mitte oder an der Rohrwand entlangströmen. Ein wesentlicher Grund für die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten der Streuteilchen ist die Reibung der Trägerflüssigkeit an der Rohrwand. Demgemäß wird das Doppler-Meßsignal-Spektrum aus vielen verschiedenen Differenzfrequenzen gebildet, so daß ein relativ breites, niedriges Meßsignal mit einem entsprechend niedrigen Nutz/Stör-Signal-Verhältnis entsteht. Für ein möglichst scharfes Meßsignal und damit eine genaue und empfindliche Messung kleiner Flüssigkeitsströme in Rohren mit kleinem Innendurchmesser ist daher eine möglichst gleichmäßige Geschwindigkeit über den Rohrquerschnitt anzustreben.

Eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung der Streuteilchen über den Rohrquerschnitt und damit schärfere Doppler-Meßsignale werden erhalten, wenn die Innenwand des Stahlrohres mit einem Material beschichtet wird, das eine Oberflächenenergie von weniger als 200 mN/m aufweist. Ein solches Material kann beispielsweise Polyoxymethylen, Polyvinylchlorid, Polymethylmethacrylat, Arelmethylmethacrylat, Polysulfon, Polyacetalharz, Polyethylenterephthalat, Polycarbonat, Epoxy-Harz, Polyetherimid, Polyetheretherketon, Polyamidimid, Polyimid- oder Polybutylenterephthalat sein. Ferner kann dazu ein Fluorkohlenstoff- oder Fluorkohlenwasserstoff-Polymeres, wie PVFD oder PTFE verwendet werden.

Die niedrige Oberflächenenergie ist dabei um so wichtiger, je kleiner der Innenquerschnitt des Meßrohres ist, denn die Wirkung der Oberflächenenergie erstreckt sich im wesentlichen nur auf einige Zehntel Millimeter. Die Schichtdicke der Innenauskleidung des Meßrohres beträgt vorzugsweise weniger als 0,5 mm. Zur Innenauskleidung des Meßrohres kann ein entsprechend dünner Schlauch aus einem der genannten Kunststoffe in das Rohr eingezogen werden. Ferner ist es möglich, das Rohr innen im Vakuum mit einem dieser Kunststoffe zu bedampfen, beispielsweise mit Parylene, bzw. mit einer Kunststofflösung zu beschichten. Bei Verwendung von Parylene ist die Schicht, die im Vakuum aufgedampft wird, weniger als 100 µm vorzugsweise 5–30 µm stark. D. h., damit kann auch ein Kapillarrohr mit einem Innendurchmesser von weniger als 1 mm, vorzugsweise 0,3 bis 0,7 mm innen beschichtet werden. Wenn herkömmliche piezoelektrische Schwingerplättchen mit einem Durchmesser von 3–4 mm verwendet werden, müssen diese allerdings zum Meßrohr hin entsprechend keilförmig verjüngt ausgebildet werden, um sie an solche kleine Meßrohrinnendurchmesser anzupassen.

Bei der Strömungsmessung nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip beeinträchtigt eine laminare Strömung die Schärfe des Doppler-Meßsignales, da die laminare

Strömung das bekannte, im Querschnitt parabelförmige Geschwindigkeitsprofil mit der höchsten Geschwindigkeit in der Rohrmitte und der Geschwindigkeit Null an der Rohrwand ausbildet. Demgemäß muß die Strömungsgeschwindigkeit im Meßrohr so eingestellt werden, daß eine turbulente Strömung entsteht, also eine Reynolds Zahl > 2300 , insbesondere > 4000 . Damit eine gleichmäßige turbulente Strömung im Rohr im Meßbereich sich einstellt, also im Bereich der Schallwandler, muß eine ausreichend lange Vorlaufstrecke vor dem Meßbereich mit dem gleichen Innenquerschnitt wie im Meßbereich vorgesehen sein.

Dies ist jedoch nur für kontinuierliche Strömungen von Bedeutung. Bei intermittierenden Strömungen, beispielsweise der Tropfenmessung, ist eine solche Vorlaufstrecke nicht erforderlich. Damit lassen sich sehr kurze Bauformeln der erfindungsgemäßen Vorrichtung erreichen, so daß sie problemlos in die Leitung, meist am Ende des Auslaufs als In-Line-Gerät eingebaut werden kann. Die jetzt erreichbare Kürze der Vorrichtung beträgt etwa 30 mm. Bestehende Anlagen können damit ohne weiteres nachgerüstet werden.

Zur Bildung ebener Innen- und Außenflächen weist das Meßrohr vorzugsweise einen ovalen Querschnitt auf. Ein solches Meßrohr läßt sich relativ leicht erhalten, wenn ein kreisrundes Rohr zusammengequetscht wird. Damit wird ein problemlos herstellbarer Übergang zum kreisrunden Querschnitt gebildet, der an den Meßrohrenden meist notwendig ist, da die Leitung, an die das Meßrohr angeschlossen wird, im allgemeinen einen kreisrunden Querschnitt aufweist. Es ist allerdings nicht so ohne weiteres möglich, ein kreisrundes Stahlrohr so zusammenzuquetschen, daß zwei einander gegenüberliegende planparallele Innen- und Außenflächen gebildet werden. Denn aufgrund der Eigenelastizität neigt ein solches zusammengequetschtes Stahlrohr dazu, insbesondere wenn es eine dünne Wandstärke von weniger als 0,5 mm besitzt, sich nach außen oder innen zu verformen. Dann ist es zweckmäßig, das Meßrohr mit einem anschließend entfernbaren Wirkstoff, z. B. einem löslichen Material, wie Kochsalz, aufzufüllen und ggf. zu verschließen, bevor es z. B. mit einer Presse oder im Schraubstock zusammengequetscht wird. Der Feststoff, also beispielsweise das Kochsalz, wird anschließend herausgelöst.

Für Versuche wurde ein Stahlrohr mit einem Innendurchmesser von 4 mm und einer Wandstärke von 0,5 mm zu einem Meßrohr mit ovalem Querschnitt so zusammengequetscht, daß der Abstand der Innenflächen voneinander 1,7 mm betrug, also der Innenquerschnitt des Rohres eine Breite von etwa 5 mm aufwies. Die Außenflächen wurden dann plan nachgeschliffen.

Die Sendeschallwandler und Dämpfungsschallwandler werden vorzugsweise in Form von piezoelektrischen Schwingerplättchen eingesetzt, wobei die Breite dieser Plättchen kleiner ist als die Breite der ebenen Innenflächen des Meßrohres. So beträgt bei dem erwähnten Versuchsmeßrohr mit einer Breite der Innenflächen von 5 mm die Breite der Schwingerplättchen 4 mm.

Der Einstrahlwinkel des Ultraschalls von der Rohrinnenwand in die Flüssigkeit beträgt vorzugsweise 40 bis 50°, bezogen auf die Senkrechte zur Rohrlängsachse. Dazu wird vorzugsweise auf die Außenwand des Meßrohres ein Körper aufgebracht, der ein oder mehrere plane Außenflächen aufweist, auf denen die als piezoelektrische Schwingerplättchen ausgebildeten Schallwandler befestigt werden. Dieser Körper besteht vorzugsweise aus einem Material mit einem E-Modul von

mindestens 2500 MPa, beispielsweise Polymethylmethacrylat (PMMA), insbesondere gegossenes PMMA. Die planen Außenflächen des Körpers weisen einen solchen Winkel gegenüber der Rohrlängsachse auf, daß sich nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz der bevorzugte Einstrahlwinkel des Ultraschalls von 30 bis 50° in das Rohr ergibt.

Der Mitnahmeeffekt und damit die Phasenverschiebung bei der Phasennessung sind um so größer, je größer der Einstrahlwinkel, bezogen auf die Senkrechte zur Rohrlängsachse, ist, ist also theoretisch bei einem Einstrahlwinkel von 90° am größten, d. h. wenn der Schallstrahl parallel zur Strömung verläuft. Andererseits führt ein großer Einstrahlwinkel zur Totalreflektion, so daß die Energie des von der Flüssigkeit in die Rohrwandung und dann in den Körper zum Empfangsschallwandler gelangenden Ultraschalls mit zunehmendem Einstrahlwinkel abnimmt.

Das ovale Meßrohr ist insbesondere für kleine Innenquerschnitte geeignet. Bei größeren Innenquerschnitt hat sich ein Meßrohr mit sechseckigem oder gar achteckigem Querschnitt als besonders geeignet erwiesen. Ein sechseckiger oder achteckiger Querschnitt des Meßrohres wird einem rechtwinkligen Querschnitt vorgezogen, weil die Strömungsgeschwindigkeit in den rechtwinkligen Ecken eines Rechtecks stärker herabgesetzt wird als in den Ecken eines Sechsecks oder Achtecks, so daß bei einem rechteckigen Querschnittsprofil das Nutz/Störsignal-Verhältnis verhältnismäßig niedrig ist. Dies gilt insbesondere für Flüssigkeiten hoher Viskosität.

Vor allem aber können bei einem prismaförmigen Meßrohr mit sechs- oder achteckigem Querschnitt zwei Empfangsschallwandler eingesetzt werden, wobei z. B. der Sendeschallwandler an einer Fläche des Prismas und die beiden Doppler-Empfangsschallwandler an den beiden gegenüber dem Sendeschallwandler um 120° versetzten Flächen angeordnet werden.

Bei der Messung nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip ist zwischen dem Sender und den beiden Empfängern jeweils ein Mischer zur Erzeugung eines Differenzsignales aus Leitfrequenz und Empfangsfrequenz geschaltet. Ferner ist ein dritter Mischer vorgesehen, der ein Signal aus dem Differenzsignal des ersten Mixers und dem Differenzsignal des zweiten Mixers erzeugt.

Mit einer solchen Vorrichtung wird die Genauigkeit der Strömungsmessung nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip wesentlich erhöht. Es hat sich nämlich herausgestellt, daß ein wesentlicher Grund für die geringe Meßgenauigkeit nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip darin zu sehen ist, daß die Reflektion an den Reflektorteilchen durch Interferenz zu einer Impulsauslöschung führen kann. Bei dieser Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit zwei Empfängern gibt der dritte Mischer aber auch dann ein Signal ab, wenn der erste oder der zweite Mischer aufgrund einer Interferenz kein Ausgangssignal liefert.

Bei der Messung nach dem Doppler-Prinzip mit einem Sender und zwei Empfängern und der Messung der Phasendifferenz mit einem weiteren Empfänger weist die erfindungsgemäße Vorrichtung also einen Sender und drei Empfänger auf. Die beiden Doppler-Empfänger können dabei noch mit einer Impulsausfall-Überbrückungslogik verbunden sein, die den beiden Mixern nachgeschaltet ist.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann jedoch auch nur einen Doppler-Empfänger aufweisen, insbesondere wenn in klaren Flüssigkeiten, bei denen die Strömungsgeschwindigkeit nach der Ultraschall-Phasennessung

bestimmt wird, auch Verunreinigungen gemeldet werden sollen, die ab und zu vorbeiströmen.

Nachstehend ist die Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen:

5 Fig. 1 und 2 ein Meßrohr im Längs- bzw. Querschnitt nach einer ersten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung;

10 Fig. 3 und 4 ein Meßrohr im Längs- und Querschnitt nach einer zweiten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig. 5 eine Prinzipschaltung der erfindungsgemäßen Vorrichtung für das Meßrohr nach Fig. 3 und 4; und

Fig. 6 einen Schmierkreislauf als ein Anwendungsbeispiel der erfindungsgemäßen Vorrichtung.

15 Gemäß Fig. 1 strömt durch ein Meßrohr 1 eine Flüssigkeit in Richtung des Pfeiles P. Das Meßrohr besteht aus Stahl und weist eine Länge von beispielsweise 5 bis 10 cm auf.

Im mittleren Bereich sind an einander gegenüberliegenden Seiten des Meßrohres 1 planparallele Außenflächen 2 und 3 vorgesehen, auf denen im Querschnitt keilförmige Kunststoffkörper 4, 5 und 6 befestigt sind.

Auf den in der gleichen Querschnittsebene einander gegenüberliegenden Körpern 4, 5 sind auf den Außenseiten ein Sendeschallwandler bzw. ein Empfangsschallwandler in Form eines piezoelektrischen Schwingerplättchens 7, 8 angeordnet. Beide Schwingerplättchen 7, 8 sind mit gleichem Winkel in Strömungsrichtung P ausgerichtet.

30 Auf dem Körper 6 auf der Meßrohraußenfläche 3 ist an der Außenseite ein weiterer Empfangsschallwandler in Form eines piezoelektrischen Schwingerplättchens 9 angeordnet. Das Schwingerplättchen 9 ist gegen die Strömungsrichtung P, also entgegengesetzt zu den beiden Schwingerplättchen 7, 8 ausgerichtet.

35 Gemäß Fig. 2 weist das Meßrohr im Meßbereich, also im Bereich der piezoelektrischen Schwingerplättchen 7, 8 und 9, einen ovalen Querschnitt auf, d. h. nicht nur die Außenflächen 2 und 3 sind planparallel ausgebildet, sondern auch die Innenflächen 10 und 11. Der Abstand a der Innenflächen 10, 11 voneinander beträgt vorzugsweise 0,5 bis 3 mm. Die Breite b des Innenquerschnitts des Meßrohres 1 wird so gewählt, daß sie größer ist als die Breite b' der Schwingerplättchen 7, 8 und 9.

45 Der Schallstrahl S des Senders 7 tritt in die Flüssigkeit mit einem Einstrahlwinkel α von etwa 45°, bezogen auf die Senkrechte zur Rohrlängsachse, ein (Fig. 3).

Wenn sich in der Flüssigkeit Reflektorteilchen befinden, wird der Schallstrahl S reflektiert, wie anhand des Streuteilchens 12 gezeigt, und die reflektierte Strahlung S', die aufgrund des Doppler-Effekts durch die Bewegung des Teilchens 12 in Richtung des Pfeiles P frequenzverschoben ist, wird vom Doppler-Empfänger 8 in ein elektrisches Signal umgewandelt.

55 Wenn der Schallstrahl S nicht auf ein Teilchen 12 trifft, wird er, wie in Fig. 1 gestrichelt dargestellt, an den Innenflächen 10, 11 des Meßrohres 1 mehrmals, also beispielsweise sechsmal reflektiert, bevor er auf den Empfänger 9 trifft. Da der Schallstrahl S in Strömungsrichtung P verläuft, wird er durch die Strömung auf seinem Weg zum Empfänger 9 mitgenommen, wodurch seine Laufzeit verkürzt wird, so daß er phasenverschoben vom Phasenverschiebungsempfänger 9 empfangen wird.

65 Da es sich nicht um einen einzigen Schallstrahl handelt, sondern um eine Schallkeule mit einer bestimmten, sich verbreiternden Querschnittsfläche, wird regelmäßig nach der Phasennessung und der Doppler-Messung

ein Signal geliefert.

Diese beiden Signale werden in ihrem Aussagewert durch Kalibrierung in Deckung gebracht.

Gemäß Fig. 3 und 4 ist das Meßrohr im Querschnitt sechseckig ausgebildet. Neben dem Doppler-Empfänger 8 ist ein zweiter Doppler-Empfänger 13 vorgesehen. Der Sender 7 ist mit dem Körper 4 an der Außenfläche 14 des Sechsecks befestigt, der Doppler-Empfänger 8 mit dem Körper 5 an der Außenfläche 15, der Doppler-Empfänger 13 mit dem Körper 16 an der Außenfläche 17 und der Phasenverschiebungsempfänger 9 mit dem Körper 6 an der Außenfläche 18 des Sechsecks.

Dadurch sind die Doppler-Empfänger 8 und 13 jeweils um 120° gegenüber dem Sender 7 versetzt angeordnet, während der Phasenverschiebungsempfänger 9 an der der Fläche 14 gegenüberliegenden Fläche 18 liegt. Der Sender 7 sowie die beiden Doppler-Empfänger 8 und 13 sind in der gleichen Querschnittsebene angeordnet. Der Phasenverschiebungsempfänger 9 ist in einem solchen Abstand von dem Sender 7 angeordnet, daß der Schallstrahl S, der von dem Sender 7 ausgesendet und vom Phasenverschiebungsempfänger 9 empfangen wird, mehrmals an den Rohrrinnenflächen 19, 20 reflektiert wird, die den Außenflächen 14 und 18 benachbart sind.

Gemäß Fig. 5 liefert ein Hochfrequenzoszillator 21 mit einer Sendefrequenz von z. B. 10 MHz die Ultraschallsendefrequenz, die von einem Verstärker 22 verstärkt dem Sender 7 zugeführt wird, der den Ultraschall S mit einem Einstrahlwinkel α schräg in die Strömungsrichtung P in die Flüssigkeit einstrahlt, wie in Fig. 3 dargestellt.

Wenn sich in der Flüssigkeit in der vom Ultraschall S erzeugten Schallkeule ein Teilchen 12 befindet, wird der Ultraschall S an dem Teilchen 12 reflektiert und die reflektierte Strahlung S1 (Empfangsfrequenz), die aufgrund des Doppler-Effekts frequenzverschoben ist, von den beiden Doppler-Empfängern 8 und 13 in ein elektrisches Signal umgewandelt.

Das vom Doppler-Empfänger 8 erzeugte elektrische Signal wird über einen Verstärker 23 einem ersten Mischer 24 zugeführt, in dem die Differenzbildung von Leitfrequenz und Empfangsfrequenz erfolgt, die das erste Differenz- oder Dopplersignal ergibt.

Die von dem Teilchen 12 reflektierte frequenzverschobene Strahlung S1 wird gleichzeitig von dem zweiten Empfänger 13 erfaßt, der ein entsprechendes elektrisches Signal erzeugt, das über einen Verstärker 25 einem zweiten Mischer 26 zugeführt wird, in dem ebenfalls die Differenzbildung von der Leitfrequenz und Empfangsfrequenz vorgenommen wird, die dann das zweite Doppler-Signal ergibt.

Das im ersten Mischer 24 erzeugte erste Doppler-Signal und das im zweiten Mischer 26 erzeugte zweite Doppler-Signal werden über nicht dargestellte Niederfrequenz-Filter einer Auswerteschaltung 27 zugeführt.

Der Phasenverschiebungsempfänger 9 ist über einen Verstärker 28 mit einer Vorverarbeitungsstufe 29 verbunden, die eine Jitterunterdrückung 30 aufweist. Die Vorverarbeitungsstufe 29 ist über eine Auskopplung 32 an den Oszillator 21 angeschlossen. Zwischen der Auskopplung 32 und der Vorverarbeitungsstufe 29 ist eine Phasenkalibrierung 33 vorgesehen. Mit ihr kann eine elektronische Feinkalibrierung nach der Montage der Schallwandler 7 und 9 durchgeführt werden. An die Vorverarbeitungsstufe 29 ist der Vergleich 31 angeschlossen. Der Vergleich 31 ist an eine Einrichtung 34 angeschlossen, die ein externes Signal abgibt in Volt,

Milliampere oder digital, seriell oder parallel oder ein Prozeß-BUS mit "Telegrammen" in schneller Folge zur Übermittlung des Zustandes des Meßmediums zur weiteren Auswertung in der Auswerteschaltung 27, zur Steuerung, als Alarm-Meldesignal, an einen Drucker usw.

Die Auswerteschaltung 27 ist als Algorithmussschaltung zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Ausgangssignale des ersten und des zweiten Mischers 24, 27 sowie des Vergleichers 31 ausgebildet.

Sie weist einen dritten Mischer 35 mit einem Impulsspeicher 36 auf. Dem Impulsspeicher 36 werden die digitalisierten Impulse des ersten Mischers 24 und des zweiten Mischers 26 zugeführt. In einem Mischglied 37 werden dann die Impulse des ersten und des zweiten Mischers 24, 26 vermischt. Falls im Impulsspeicher 36 festgestellt worden ist, daß in einem oder in beiden Impulsszügen gleichzeitig eine Amplitude ausgefallen ist, wird das gemischte Signal mit einem Impulsausfüllglied 38 entsprechend ausgefüllt. Ein weiteres Glied 39 stellt fest, wenn in den Impulsszügen beider Mischer 24 und 26 mindestens zwei Amplituden gleichzeitig hintereinander fehlen. Dies bedeutet, daß sich nach der Ultraschall-Dopplermessung die Strömung nicht mehr bewegt. Damit kann eine sehr genaue Bestimmung sehr kleiner Flüssigkeitsmengen durchgeführt werden. Von der Auswerteschaltung 27 wird dann extern ein Signal in Volt, Milliampere oder digital, seriell oder parallel oder ein Prozeß-Bus mit "Telegrammen" in schneller Folge zur Übermittlung des Zustandes des Meßmediums zur weiteren Auswertung, zur Steuerung, als Alarm-Meldesignal oder an einen Drucker abgegeben.

Mit der Auswerteschaltung 27 wird das Ergebnis der Doppler- und der Phasenmessung qualitativ bewertet, also danach, was überwiegt, das Doppler-Signal oder die Phasenverschiebung, ferner quantitativ, d. h. die Strömungsgeschwindigkeit sowie in weiterer Hinsicht qualitativ, nämlich ob viele oder wenig Reflektoren (Gasblasen oder Feststoffe) in der Flüssigkeit vorliegen, d. h. auch Störungen der Messung.

Da die Schallgeschwindigkeit jeweils vom Meßstoff abhängt und dessen Schallgeschwindigkeit wieder von der Temperatur, ist es bei Anwendungen, die über einer reinen Überwachungsfunktion liegen, erforderlich, eine Temperaturmeßeinrichtung 40 vorzusehen, die mit der Phasenkalibrierung 33 verbunden ist, um die Temperatur als Korrekturwert in die Schaltung einzuführen.

Statt an die Phasenkalibrierung 33 kann, wie in Fig. 5 gestrichelt dargestellt, die Temperaturmeßeinrichtung 40 auch mit der Auswerteschaltung 27 verbunden sein. Die Temperatur kann auch als analog gewandelter Digitalwert dazu herangezogen werden, daß man aus einer Tabelle einen Korrekturwert herausnimmt, der das Phasenmeßsignal korrigiert. Die Temperatur des Meßstoffs kann auch angezeigt werden.

In der Auswerteschaltung 27 kann sich ein Mikroprozessor, ein schneller Signalprozessor, befinden, ferner ein Analog-Digital-Wandler.

Ferner kann für die Doppler-Signale und die Phasenverschiebung jeweils ein Analysator 41 vorgesehen sein. Bei besonders hohen Amplituden der Doppler-Signale, z. B. durch einen zu hohen Feststoffgehalt in der Flüssigkeit, oder einer hohen Phasenverschiebung aufgrund einer entsprechend hohen Strömungsgeschwindigkeit, beispielsweise durch eine geplatzte Leitung, betätigt der Analysator 41 beispielsweise einen Aktuator, z. B. ein Ventil.

Das Signal, das dem Analysator 41 zugeführt wird,

wird nach den Mischern 24 und 26 bzw. nach der Verstärkerstufe 29 aus dem Pfad des Phasenverschiebungsempfängers 9 entnommen.

Ferner ist ein Regler 42 zur Verstärkung der Leistung des Senders 7 in Abhängigkeit von der Amplitude der Impulse der beiden Mischer 24 und 26 vorgesehen.

Wenn mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung eine einfache Überwachung nach dem "Flow"/"No Flow"-Prinzip durchgeführt wird, die zumeist bei Zimmertemperatur abläuft, kann auf eine Temperaturmessung verzichtet werden. Für eine zuverlässige Überwachung muß die Phasenverschiebung dann aber einen Überschuß gegenüber der temperaturbedingten Drift der Schallgeschwindigkeit besitzen. Diese Drift beträgt bei 25° Ausgangsraumtemperatur etwa $\pm 10\%$ vom Meßwert.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist vielseitig einsetzbar, insbesondere zur Messung von Flüssigkeitsströmen, die Verunreinigungen enthalten können. Diese Flüssigkeiten stellen in der Praxis eine große Gruppe dar. So ist die Phasenmessung beispielsweise im allgemeinen dann nicht mehr möglich, wenn der Volumengehalt der Ultraschallreflektoren in der Flüssigkeit etwa 1 Vol.-% übersteigt. Die Ultraschallreflektoren können dabei auch Gasbläschen sein, z. B. in einem organischen Lösungsmittel, wie Benzin oder Toluol, als Meßstoff. In einem solchen Fall wird mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung die Flüssigkeitsströmung aufgrund des Ultraschall-Doppler-Prinzips erfaßt.

Das erfindungsgemäße Verfahren führt also zu einer wesentlichen Verbesserung der Prozeßsicherheit. Durch Gase und/oder Feststoffe verschmutzte Meßmedien werden zuverlässig erkannt, insbesondere auch temporäre Veränderungen des Meßmediums, wodurch die Ursachenerkennung bei Prozeßstörungen wesentlich erleichtert wird.

Ein Anwendungsbeispiel für die erfindungsgemäße Vorrichtung stellt das in Fig. 6 schematisch dargestellte Zentralkreislaufschmiersystem dar, bei dem über eine Leitung 43 mit einem Schmierölvorratsbehälter 44 und einer Pumpe 45 über eine Vielzahl von Ventilen 46, 47, ..., beispielsweise in Abhängigkeit von der Zeit oder der Temperatur tropfenweise Schmieröl über die erfindungsgemäßen Meßvorrichtungen 48, 49, 50 ... Dutzenden oder gar Hunderten von Schmierölabgabestellen 51, 52, 53, ... zugeführt werden.

Wenn das Schmieröl frisch ist, enthält es meistens keine oder zu wenig Reflektoren für eine Messung nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip. Dann kann mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung die Schmierölaufuhr zu den Abgabestellen 51, 52, 53, ... mit den Meßvorrichtungen 48, 49, 50, ... jedoch durch die Phasenmessung festgestellt werden.

Durch Oxidation und Feuchtigkeit bilden sich in dem Schmieröl jedoch meist schon nach kurzer Zeit Teerpartikel bzw. Wassertropfen und damit Reflektoren, die eine Messung nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip ermöglichen, eine Phasenmessung jedoch unmöglich machen. Wenn die Pumpe 45 z. B. über Nacht abgestellt wird, können sich diese Verunreinigungen absetzen, d. h. es wird wieder ein reflektorfreier Meßstoff erhalten, der nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip nicht meßbar ist, usw.

Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann also zuverlässig die Schmierölabgabe unabhängig vom Reinheitsgrad oder dem sonstigen Zustand des Schmieröls kontrolliert werden. Durch den Analysator 41 wird zugleich angezeigt, wenn Störungen eintreten, beispiels-

weise wenn der Öl stand in dem Vorratsbehälter 44 so weit abfällt, daß die Pumpe 45 Luftbläschen in das Öl pumpt. D. h., mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung werden eine Vielzahl von Zustandsänderungen des Meßstoffs zuverlässig erfaßt.

Ein anderes Beispiel für die Anwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung bildet die Filmbeschichtung, beispielsweise zur Herstellung von Farbfilmen mit mehreren Silberhalogenidemulsionen, die über separate Zuleitungen in einer Vielzahl von Schichten aufgetragen werden. Durch Einsatz der erfindungsgemäßen Vorrichtung in jeder Zuleitung kann die Strömungsgeschwindigkeit der betreffenden Emulsion und damit die Schichtdicke der einzelnen Schichten bestimmt werden, und zwar durch die Phasenmessung, da die Silberhalogenidemulsionen keine nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip erfaßbaren Reflektoren enthalten.

Gasblasen in den Emulsionen führen zu Fehlern, d. h. der Farbfilm muß dann verworfen werden. Gasblasen treten insbesondere zu Beginn der Beschichtung durch Luft in den Zuleitungen auf. Um festzustellen, ob Gasblasen vorhanden sind, werden heutzutage Schaugläser in den Zuleitungen verwendet. Diese Überwachung ist nicht nur aufwendig und ermüdend, vielmehr sind damit kleine Bläschen nicht feststellbar, so daß meistens noch mehrere Stunden nachgegossen wird, bis mit der eigentlichen Filmbeschichtung begonnen wird. Das nachgegossene Filmmaterial wird verworfen. Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann hingegen sofort und zuverlässig festgestellt werden, wann die betreffende Filmemulsion luftbläschenfrei ist, wobei auch noch Luftbläschen im μm -Bereich sicher erfaßt werden. In ähnlicher Weise kann die erfindungsgemäße Vorrichtung bei der Beschichtung von Ton- und Videobändern eingesetzt werden.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel: In einem Lackierbad, bei dem eine Wasser-Lack-Dispersion im Kreislauf geführt wird, unterliegt die Lackkonzentration vom Ansatz bis zur Verwerfung ständigen Schwankungen, z. B. durch Verschlammung und Verklumpung des Lacks, Verdunstung des Wassers, Zusatz von frischem Lack usw.

Wenn eine solche Wasser-Lack-Dispersion im Bypass mit einer Meßvorrichtung nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip gemessen wird, können bei einem schwachen Meßsignal unterschiedliche Ursachen vorliegen. D. h., es kann beispielsweise nicht festgestellt werden, ob eine Lackunterkonzentration vorliegt, so daß frischer Lack zugesetzt werden muß, oder ob sich die Leitung zugesetzt hat. Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann hingegen die Ursache genau ermittelt werden, d. h. wenn nach diesem Beispiel eine Flüssigkeitsströmung durch Phasenmessung ermittelt wird, liegt eine Unterkonzentration vor.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Messung kleiner Flüssigkeitsströme in einem Meßrohr mit Hochfrequenz-Ultraschall, wobei zur Messung nach dem Ultraschall-Doppler-Prinzip ein Sendeschallwandler und wenigstens ein Empfangsschallwandler vorgesehen sind, die am Meßrohr im gleichen Querschnittsbereich angeordnet und gemeinsam in oder gegen die Strömung ausgerichtet sind, wobei zwischen dem Sendeschallwandler und dem Empfangsschallwandler ein Mischer zur Erfassung der Differenz aus Leitfrequenz und Empfangsfrequenz geschaltet

ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Messung des Flüssigkeitsstroms nach der Ultraschallphasenmessung ein weiterer Empfangsschallwandler (9) vorgesehen ist, der entgegengesetzt zu den beiden anderen Schallwandlern (7, 8) in einem solchen Abstand von denselben am Meßrohr (1) angeordnet ist, daß der Schallstrahl (S), der von dem Sendeschallwandler (7) ausgesendet und von dem weiteren Empfangsschallwandler (9) empfangen wird, mehrmals an der Meßrohrinnenwand reflektiert wird, wobei ein Vergleichs (31) zur Erfassung der Phasenverschiebung zwischen der Leitfrequenz und der von dem weiteren Empfangsschallwandler (9) empfangenen Frequenz vorgesehen ist, wobei das Meßrohr im Bereich der Schallwandler (7, 8, 9) zur Reflektion des Schallstrahls (S) zwei einander gegenüberliegende planparallele Innenflächen (10, 11) mit planparallelen Außenflächen (2, 3; 14, 18) aufweist, wobei die Schallwandler (7, 8, 9) eine kleinere Breite (b') als die Breite (b) der planparallelen Innenflächen (10, 11) besitzen.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand (a) der einander gegenüberliegenden planparallelen Innenflächen (10, 11) 0,5 bis 10 mm beträgt.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßrohr (1) zur Bildung ebener Innen- und Außenflächen (2, 3, 10, 11) einen ovalen Querschnitt aufweist.

4. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßrohr zur Bildung planarer Innen- und Außenflächen (14, 15, 17, 18) im Querschnitt sechs-, sieben- oder achteckig ausgebildet ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß zur Messung nach dem Hochfrequenz-Ultraschall-Doppler-Prinzip ein weiterer Empfangsschallwandler (13) in dem gleichen Querschnittsbereich wie der Sendeschallwandler (7) vorgesehen ist, wobei die drei Schallwandler (7, 8, 13), die in diesem Querschnittsbereich an verschiedenen Flächen (14, 15, 17) des Sechsecks, Siebenecks oder Achtecks angeordnet sind, gemeinsam in oder gegen die Strömungsrichtung gerichtet sind, wobei zwischen dem Empfangsschallwandler (7) und jedem der beiden Empfangsschallwandler (8, 13) in diesem Querschnittsbereich jeweils ein Mischer (24, 26) zur Erzeugung eines Differenzsignales aus Leitfrequenz und Empfangsfrequenz geschaltet ist und ein dritter Mischer (35) vorgesehen ist, der ein Signal aus den Differenzsignalen des ersten und des zweiten Mixers (16 und 17) erzeugt.

6. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßrohr (1) aus Stahl besteht.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßrohr (1) an der Innenwand mit einem Material beschichtet ist, das eine Oberflächenenergie von weniger als 200 mN/m aufweist.

8. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Ultraschall-Einstrahlwinkel (α) von der Rohrinne wand in die Flüssigkeit 40 bis 50°, bezogen auf die Senkrechte der Rohrlängsachse, beträgt.

9. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Schallwandler (7, 8, 9, 13) durch piezoelektrische Schwingerglättchen gebildet sind.

10. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Leitfrequenz mindestens 5 MHz beträgt.

11. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Vergleichs (31) über eine Auskopplungsstufe (32) an den Oszillator (21) zur Erzeugung der Leitfrequenz angeschlossen ist.

12. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausgangssignale des Mixers bzw. des ersten und des zweiten Mixers (24, 26) sowie des Vergleichers (31) einer Auswerteschaltung (27) zugeführt werden, die nach außen ein Signal abgibt.

13. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Einrichtung (40) zur Temperaturmessung der Flüssigkeit vorgesehen ist, deren Ausgangssignal als Korrekturwert dem Vergleichs (31) und/oder der Auswerteschaltung (27) zugeführt wird.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswerteschaltung (27) als Algorithmuschaltung zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Ausgangssignale des Mixers bzw. des ersten und des zweiten Mixers (24, 26) sowie des Vergleichers (31) ausgebildet ist.

15. Verwendung der Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche zur Messung kleiner Flüssigkeitsströme, die Verunreinigungen enthalten können.

16. Verwendung der Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 14 zur Messung kleiner Flüssigkeitsströme, die einen Gehalt an Ultraschallreflektoren aufweisen, der zwischen 0 und mehr als 1 Vol.-% schwankt.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG.1

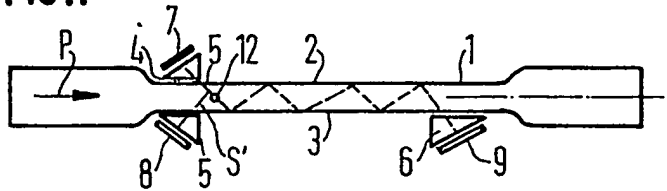


FIG.2

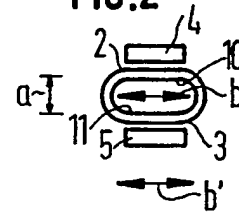


FIG.3

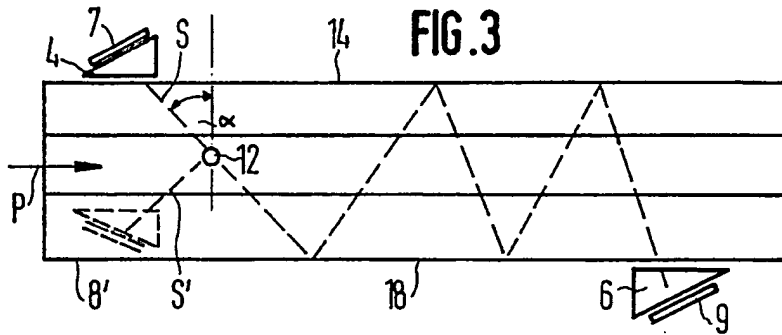


FIG.4

